

**Н. В. РУДЕВИЧ, О. Г. ГРИБ, М. Ф. ПІСКУРЬОВ, І. Т. КАРПАЛЮК**

## **РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОНІЗОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ**

Сучасні комп'ютерні технології, в основі яких лежать прикладні пакети, дають можливість більш глибокого вивчення питань, пов'язаних з процесами в елементах електричних систем, зокрема і асинхронізованих генераторів. Інструментом дослідження може слугувати програма Matlab, що потребує реалізації математичної моделі асинхронізованого генератора в її середовищі. Представлення асинхронізованого генератора математичною моделлю в фазних координатах дозволить отримувати реальні значення параметрів режиму, а, отже, і контролювати фізику процесу. Реалізація математичної моделі асинхронізованого генератора в фазних координатах базується на наступних припущеннях: магнітна система машини ненасичена, через що індуктивності машини не залежать від сили намагнічування; замість дійсних кривих розподілу сили намагнічування і індукції, в повітряному зазорі по розточуванню статора приймають тільки їх основні, перші гармонійні складові, відповідно чому наведені в статорі електрорушійні сили виражаються синусоїдами основної частоти; в магнітній системі машини відсутні які-небудь втрати; конструктивне виконання машини забезпечує повну симетрію фазних обмоток статора; ротор також симетричний щодо своїх подовжньої і поперечної осей: обмотки збудження розташовані в обох осях, демпферна обмотка ротора замінена двома взаємно перпендикулярними короткозамкнутими обмотками, розташованими одна в подовжній, а інша в поперечній осях, не враховується гістерезис. Реалізація математичної моделі асинхронізованого генератора здійснена за допомогою систем рівнянь, що визначають струми, напругу та потікозчеплення в обмотках збудження, струми та потікозчеплення в демпферних обмотках, електрорушійні сили, напругу та струми в обмотках статора та основного рівняння руху ротора генератора. Розроблену реалізацію математичної моделі можна використовувати для дослідження перехідних процесів, що виникають в асинхронізованому генераторі при підключенні та зміні навантаження, при несиметричних режимах роботи, при коротких замиканнях в обмотках ротора та статора, при зміні швидкості обертання ротора.

**Ключові слова:** математична модель, асинхронізований генератор, фазні координати, демпферна обмотка, обмотка збудження, статор.

**Н. В. РУДЕВИЧ, О. Г. ГРИБ, М. Ф. ПІСКУРЬОВ, І. Т. КАРПАЛЮК**

## **РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ В СРЕДЕ МАТЛАВ**

Современные компьютерные технологии, в основе которых лежат прикладные пакеты, дают возможность более глубокого изучения вопросов, связанных с процессами в элементах электрических систем, в частности и асинхронизированных генераторах. Инструментом исследования может служить программа Matlab, которая требует реализации математической модели асинхронизированного генератора в ее среде. Представление асинхронизированного генератора математической моделью в фазных координатах позволит получать реальные значения параметров режима, а, следовательно, и контролировать физику процесса. Реализация математической модели асинхронизированного генератора в фазных координатах базируется на следующих допущениях: магнитная система машины ненасыщена, из-за чего индуктивности машины не зависят от силы намагничивания; вместо действительных кривых распределения силы намагничивания и индукции, в воздушном зазоре по расточке статора принимают только их основные, первые гармонические составляющие, соответственно этому приведенные в статоре электродвижущие силы выражаются синусоидами основной частоты; в магнитной системе машины отсутствуют какие-либо потери; конструктивное выполнение машины обеспечивает полную симметрию фазных обмоток статора; ротор также симметричен относительно своих продольной и поперечной осей: обмотки возбуждения расположены в обеих осях, демпферная обмотка ротора заменена двумя взаимно перпендикулярными короткозамкнутыми обмотками, расположенными одна в продольной, а другая в поперечной осях, не учитывается гистерезис. Реализация математической модели асинхронизированного генератора осуществлена с помощью систем уравнений, которые определяют токи, напряжения и потокозцепления в обмотках возбуждения, токи и потокозцепления в демпферных обмотках, электродвижущие силы, напряжения и токи в обмотках статора и основного уравнения движения ротора генератора. Разработанную реализацию математической модели можно использовать для исследования переходных процессов, которые возникают в асинхронизированном генераторе при подключении и изменении нагрузки, при несимметричных режимах работы, при коротких замыканиях в обмотках ротора и статора, при изменении скорости вращения ротора.

**Ключевые слова:** математическая модель, асинхронизированный генератор, фазные координаты, демпферная обмотка, обмотка возбуждения, статор.

**N. V. RUDEVICH, O. H. HRYB, M. F. PISKUROV, I. T. KARPALIUK**

## **REALIZATION OF MATHEMATICAL MODEL OF ASYNCHRONIZED GENERATOR IN PHASE COORDINATES IN ENVIRONMENT MATLAB**

Modern computer technologies, that the applied packages are the basis of, give an opportunity of deeper study of the questions related to the processes in the elements of the electric systems, in particular and asynchronous generators. A research instrument the program Matlab, that requires realization of mathematical model of asynchronous generator in her environment, can serve as. Presentation of asynchronous generator a mathematical model in phase coordinates will allow to get the real values of parameters of the mode, and, consequently, and to control physics. Realization of mathematical model of asynchronous generator in phase coordinates is based on next assumptions: the magnetic system of machine is unsaturated, from what inductances of machine do not depend on force of magnetizing; instead of actual distribution of force of magnetizing and induction curves, in an air-gap on boring of stator accept their basic, first harmonious constituents only, according to it the electromotive forces driven to stator are expressed by the sinewaves of fundamental frequency; some losses are absent in the magnetic system of machine; structural implementation of machine provides complete symmetry of phase windings of stator; a rotor is also symmetric in relation to it longitudinal and transversal axes: windings of excitation is located in both axes, the damper puttee of rotor is transferable two mutually perpendicular shortcircuited winding located one in longitudinal, and other in transversal axes, not taken into account hysteresis. Realization of mathematical model of asynchronous generator is carried out by means of the systems of equalizations, which determine currents, tensions and flow-through in windings of excitation, currents and flow-through in damper

© Н. В. Рудевич, О. Г. Гриб, М. Ф. Піскурьов, І. Т. Карпалюк, 2019

windings, electromotive forces, tensions and currents in windings of stator and basic equalization of motion of rotor of generator. The worked out realization of mathematical model can be used for research of transients that arise up in an asynchronized generator during connecting and change of loading, at asymmetrical office hours, at short circuits in windings of rotor and stator, at the change of speed rotor rotation.

**Keywords:** mathematical model, asynchronized generator, phase coordinates, damper winding, winding of excitation, stator.

**Вступ.** Успішний розвиток електроенергетичної системи України не можливий без проведення ґрунтовних наукових досліджень перехідних процесів, що відбуваються в електроустаткуванні під час різних режимів їх роботи. Сучасне прикладне програмне забезпечення дозволяє відмовитися від проведення складних досліджень на фізичних моделях, а використовувати віртуальні моделі електрообладнання [1]. Найбільш зручною та наочною на сьогодні прикладною програмою, на думку авторів, є Matlab [2, 3]. Отже, перед науковцями ставиться задача розроблення універсальних математичних моделей елементів електроенергетичної системи з метою створення в подальшому їх віртуальних моделей в середовищі Matlab для дослідження різних режимів роботи.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним з елементів електроенергетичної системи є асинхронізовані генератори, про доцільність та перспективи їх використання не одноразово наголошувалося в різних наукових джерелах [4–7]. При моделюванні процесів в таких генераторах зазвичай використовують математичну модель в  $dq$  координатах за допомогою рівнянь Парка-Горева [8–10]. Однак представлення асинхронізованого генератора математичною моделлю в фазних координатах дозволяє позбавитися від зайвих проміжних перетворень, отримувати реальні значення параметрів режиму, а, отже, і контролювати фізику процесу. В науковій публікації [11] наведено математичну модель асинхронізованого генератора в фазних координатах, яка є недостатньо універсальною з точки зору можливості дослідження усього різноманіття аварійних та ненормальних режимів, що можуть виникати як в самому генераторі, так і в навантаженні. Роботи [12, 13] присвячені створенню математичних моделей асинхронізованого синхронного генератора в фазних координатах з трифазним виконанням ротора генератора, що не відповідає конструкції тих генераторів, що працюють в електроенергетичній системі України.

**Мета статті.** Реалізація математичної моделі асинхронізованого генератора з двохосовим виконанням ротора в фазних координатах для дослідження різних режимів його роботи в середовищі Matlab.

**Основні матеріали досліджень.** Реалізація математичної моделі асинхронізованого генератора в фазних координатах базувалась на наступних припущеннях: магнітна система машини ненасичена, через що індуктивності машини не залежать від сили намагнічування; замість дійсних кривих розподілу сили намагнічування і індукції, в повітряному зазорі по розточуванню статора приймають тільки їх основні, перші гармонійні складові, відповідно чому наведені в статорі електрорушійні сили виражаються синусоїдами основної частоти; в магнітній системі

машини відсутні які-небудь втрати; конструктивне виконання машини забезпечує повну симетрію фазних обмоток статора [14]. Ротор також симетричний щодо своїх подовжньої і поперечної осей: обмотки збудження розташовано в обох осях, демпферна обмотка ротора замінена двома взаємно перпендикулярними короткозамкненими обмотками, розташованими одна в подовжній, а інша в поперечній осях, не враховується гістерезис.

На рис. 1 наведено взаємне розміщення магнітних осей фазових обмоток та осей  $d, q$  обмоток збудження і демпферних обмоток. На подовжній та поперечній осях розташовуються як обмотка збудження, так і демпферна обмотка. Обмотки збудження живляться змінною напругою частоти ковзання, а демпферні обмотки є короткозамкненими. Обмотки фаз  $A, B, C$  розташовані на відповідних магнітних осях, при цьому кут  $\gamma$  між магнітною оссю фази  $A$  та подовжньою оссю  $d$  є функцією часу.

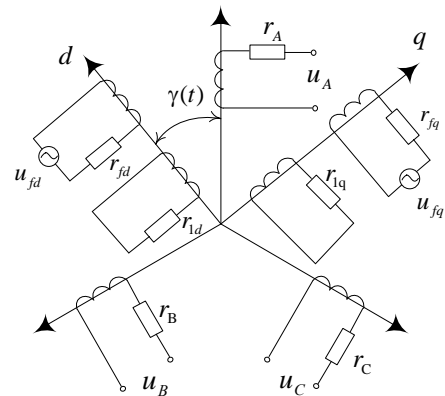


Рис. 1. Взаємне розміщення магнітних осей фазових обмоток та осей  $d, q$  асинхронізованого генератора

Струми в обмотках збудження визначаються згідно з рівняннями [15]:

$$\left. \begin{aligned} i_{fd} &= \frac{\psi_{fd} - M_{fdA}i_A - M_{fdB}i_B - M_{fdC}i_C - M_{fd1d}i_{1d}}{L_{fd}} \\ i_{fq} &= \frac{\psi_{fq} - M_{fqA}i_A - M_{fqB}i_B - M_{fqC}i_C - M_{fq1q}i_{1q}}{L_{fq}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $i_{fd}, i_{fq}, i_{1d}, i_{1q}$  – струми в обмотках збудження та демпферних обмотках за відповідними осями;

$\psi_{fd}, \psi_{fq}$  – потокозчеплення обмоток збудження за відповідними осями;

$M_{fdA}, M_{fdB}, M_{fdC}, M_{fqA}, M_{fqB}, M_{fqC}$  – взаємні індуктивності між обмотками збудження за подовжньою й поперечною осями та статорними обмоткам фаз  $A, B, C$  відповідно;

$L_{fd}, L_{fq}$  – власні індуктивності обмоток збудження за відповідними осями;

$M_{fd1d}, M_{fq1q}$  – взаємні індуктивності між обмотками збудження та демпферними обмотками за подовжньою й поперечною осями відповідно.

Запишемо рівняння для визначення потокозчеплення обмоток збудження [15]:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{fd} &= \int (u_{fd} - r_{fd} i_{fd}) dt \\ \psi_{fq} &= \int (u_{fq} - r_{fq} i_{fq}) dt \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $r_{fd}, r_{fq}$  – активний опір обмоток збудження за продольною та поперечною осями відповідно;

$u_{fd}, u_{fq}$  – напруга, що підведена до обмоток збудження в осях  $d$  та  $q$  відповідно.

Напруга, що підводиться до обмоток збудження визначається як [9]:

$$\left. \begin{aligned} u_{fd} &= U_{fdm} \cos(\omega_0 - \omega_p) t \\ u_{fq} &= U_{fqm} \sin(\omega_0 - \omega_p) t \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $U_{fdm}, U_{fqm}$  – амплітуди напруг збудження за осями  $d$  та  $q$  відповідно;

$\omega_0, \omega_p$  – синхронна та робоча кутова швидкість обертання ротора відповідно.

Струми в демпферних обмотках визначаються згідно з рівнянь [15]:

$$\left. \begin{aligned} i_{1d} &= \frac{\psi_{1d} - M_{1dA} i_A - M_{1dB} i_B - M_{1dC} i_C - M_{fd1d} i_{fd}}{L_{1d}} \\ i_{1q} &= \frac{\psi_{1q} - M_{1qA} i_A - M_{1qB} i_B - M_{1qC} i_C - M_{fq1q} i_{fq}}{L_{1q}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $\psi_{1d}, \psi_{1q}$  – потокозчеплення демпферних обмоток за відповідними осями;

$M_{1dA}, M_{1dB}, M_{1dC}, M_{1qA}, M_{1qB}, M_{1qC}$  – взаємні індуктивності між демпферними обмотками за подовжньою й поперечною осями та статорними обмоткам фаз  $A, B, C$  відповідно;

$L_{1d}, L_{1q}$  – власні індуктивності демпферних обмоток за відповідними осями.

Рівняння для визначення потокозчеплень демпферних обмоток мають вигляд [15]:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{1d} &= \int (-r_{1d} i_{1d}) dt \\ \psi_{1q} &= \int (-r_{1q} i_{1q}) dt \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де  $r_{1d}, r_{1q}$  – активний опір демпферних обмоток за продольною та поперечною осями відповідно.

В машині, що обертається, тільки індуктивності  $L_{fd}, L_{fq}, L_{1d}, L_{1q}$  можна вважати незмінними, всі інші  $L$  та  $M$  залежать від положення ротора відносно обмоток статора, а, отже, є функціями часу [16, 17]:

$$\left. \begin{aligned} M_{Afd} &= M_{fdA} = M_{dm} \cos \gamma \\ M_{Bfd} &= M_{fdB} = M_{dm} \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{Cfd} &= M_{fdC} = M_{dm} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{Afq} &= M_{fqA} = M_{qm} \sin \gamma \\ M_{Bfq} &= M_{fqB} = M_{qm} \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{Cfq} &= M_{fqC} = M_{qm} \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{1dA} &= M_{A1d} \cong M_{dm} \cos \gamma \\ M_{1dB} &= M_{B1d} \cong M_{dm} \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{1dC} &= M_{C1d} \cong M_{dm} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{1df} &= M_{f1d} \cong M_{dm} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{1qA} &= M_{A1q} = M_{qm} \sin \gamma \\ M_{1qB} &= M_{B1q} = M_{qm} \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{1qC} &= M_{C1q} = M_{qm} \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{1qf} &= M_{f1q} \cong M_{qm} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де  $\gamma = \omega_p t$ .

Електрорушійна сила кожної фази статора визначається згідно з системи рівнянь [18]:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= \frac{d(M_{fdA} i_{fd} + M_{1dA} i_{1d} + M_{fqA} i_{fq} + M_{1qA} i_{1q})}{dt} \\ e_B &= \frac{d(M_{fdB} i_{fd} + M_{1dB} i_{1d} + M_{fqB} i_{fq} + M_{1qB} i_{1q})}{dt} \\ e_C &= \frac{d(M_{fdC} i_{fd} + M_{1dC} i_{1d} + M_{fqC} i_{fq} + M_{1qC} i_{1q})}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Рівняння балансу напруг фаз статора запишемо у вигляді системи [18]:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= e_A - \frac{d(L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C)}{dt} - r_A i_A \\ u_B &= e_B - \frac{d(L_B i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C)}{dt} - r_B i_B \\ u_C &= e_C - \frac{d(L_C i_C + M_{CA} i_A + M_{CB} i_B)}{dt} - r_C i_C \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де  $r_A, r_B, r_C$  – активний опір обмоток статора фаз  $A, B, C$  відповідно;

$L_A, L_B, L_C$  – власні індуктивності статорних обмоток фаз  $A, B, C$  відповідно;

$M_{AB} = M_{BA}, M_{BC} = M_{CB}, M_{AC} = M_{CA}$  – взаємні індуктивності статорних обмоток фаз  $A, B, C$  відповідно.

З урахуванням симетричного виконання статорних обмоток асинхронізованого генератора власні та взаємні індуктивності визначаються як:

$$\left. \begin{aligned} L_A = L_B = L_C &= \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0) \\ M_{AB} = M_{BC} = M_{AC} &= \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де  $L_d, L_q, L_0$  – індуктивності генератора за продольною й поперечною осями та нульової послідовності.

При навантаженні, що носить активно-індуктивний характер, залежність між струмом навантаження та напругою генератора має вигляд [19]:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= r_{navA} i_A + \frac{d(L_{navA} i_A + M_{navAB} i_B + M_{navAC} i_C)}{dt} \\ u_B &= r_{navB} i_B + \frac{d(L_{navB} i_B + M_{navBA} i_A + M_{navBC} i_C)}{dt} \\ u_C &= r_{navC} i_C + \frac{d(L_{navC} i_C + M_{navCA} i_A + M_{navCB} i_B)}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

де  $r_{navA}, r_{navB}, r_{navC}$  – активний опір навантаження фаз  $A, B, C$  відповідно;

$L_{navA}, L_{navB}, L_{navC}$  – власна індуктивність навантаження фаз  $A, B, C$  відповідно;

$M_{navAB} = M_{navBA}, M_{navBC} = M_{navCB}, M_{navAC} = M_{navCA}$  – взаємоіндуктивність між фазами навантаження.

Робоча кутова швидкість обертання визначиться з основного рівняння руху ротора генератора [20]:

$$\omega_p = \omega_0 + \int \frac{M_T - M_{EL}}{T_j} dt, \quad (14)$$

де  $T_j$  – постійна інерції генератора;

$M_T$  – момент турбіни;

$M_{EL}$  – електричний момент.

Електричний момент з урахуванням втрат визначається [15]:

$$M_{EL} = \frac{(u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) + (i_A^2 r_A + i_B^2 r_B + i_C^2 r_C)}{\omega_p}. \quad (15)$$

Розрахунок вихідних параметрів математичної моделі асинхронізованого генератора  $L_d, L_q, L_0, L_{fd}, L_{fq}, L_{1d}, L_{1q}, M_{dm}, M_{qm}, r_A, r_B, r_C, r_{fd}, r_{fq}, r_{1d}, r_{1q}, T_j$  може бути здійснений на підставі довідникових даних, використовуючи формули, що наведені в роботі [21].

На рис. 2 наведено реалізацію математичної моделі асинхронізованого генератора в середовищі Matlab, в якій в підсистемі 1 (Subsystem1) реалізується рівняння 14, в підсистемі 2 – система рівнянь 12, в підсистемі 3 – системи рівнянь 6–9, в підсистемі 4 – система рівнянь 3, в підсистемі 5 – системи рівнянь 1, 2, 4, 5, в підсистемі 6 – система рівнянь 10, в підсистемі 7 – система рівнянь 11 та 15, в підсистемі 8 – система рівнянь 13.

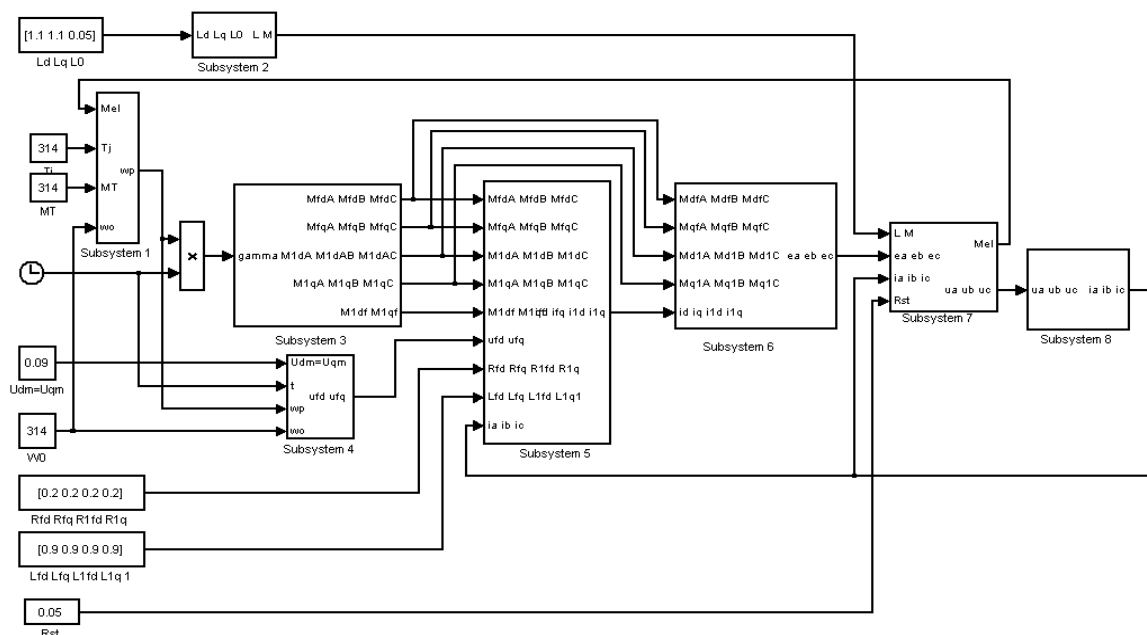


Рис. 2. Віртуальна модель асинхронізованого генератора в середовищі Matlab

Таким чином, реалізація рівнянь (1–15) в середовищі Matlab дозволила отримати наочну віртуальну модель асинхронізованого генератора з двохосовим виконанням ротора в фазних координатах.

**Висновки.** Розроблену реалізацію математичної моделі можна використовувати для дослідження перехідних процесів, що виникають в асинхронізованому генераторі при підключенні та зміні навантаження, при несиметричних режимах роботи, при коротких замиканнях в обмотках ротора та статора, при зміні швидкості обертання ротора.

Перспективними напрямками є дослідження перехідних процесів в різних режимах роботи асинхронізованого генератора за допомогою розробленої його віртуальної моделі.

#### Список літератури

- Mahseredjian J., Dinavahi V., Martinez J. Simulation Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on power delivery*. 2009. Vol. 24, no. 3. P. 1657–1669.
- Черных И. В. *Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink*. Москва: ДМК Пресс, Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
- Герман-Галкин С. Г. *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебн. пособ.* Санкт-Петербург: Корона-Век, 2008. 368 с.
- Шакарян Ю. Г., Лабунец И. А., Сокур П. В. Целесообразность и перспективы оснащения электростанций асинхронизированными турбо- и гидрогенераторами. *Научно-практическая конференция «Электроэнерго-2002». Сборник «Электросила», Вып. 42.* Санкт-Петербург, 2003. С. 35–43.
- Лабунец И. А. Асинхронизированные турбогенераторы. *Новые технологии в энергетике*. Москва: Изд-во РАО «ЕЭС России». 2002. С. 139–144.
- Шевченко В. В., Пототский Д. В. Использование асинхронизированных турбогенераторов для стабилизации напряжения в энергосистеме. *Системы озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 181–184.
- Сегеда М. С., Олексин В. П., Олексин А. В. Використання асинхронізованих турбогенераторів для підвищення надійності роботи електростанцій та регулювання напруги. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Сер.: Енергетика та електротехніка*. Вінниця: ВНТУ. 2010. № 6. С. 63–65.
- Шайбеков А. Ф., Рогинская Л. Э., Семенов В. В. Электромагнитные процессы в асинхронизированной синхронной машине. *Вестник УГАТУ*. Уфа: УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4 (70). С. 72–76.
- Шакарян Ю. Г. *Асинхронизированные синхронные машины*. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.
- Семенов В. В. Виртуальная модель асинхронизированного синхронного генератора автономных систем. *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2009. № 1 (15). С. 25–28.
- Міняйло О. С., Маврін О. І., Покровський К. Б., Чабан А. В. Математична модель асинхронізованого турбогенератора у фазних координатах. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2008. № 615. С. 93–98.
- Чашко М. В., Ревенко А. Г. Simulink модель асинхронизированного синхронного генератора. *Збірник наукових праць «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*. 2005. № 3. С. 386–388.
- Бобер В. А., Галиновский А. М., Саратов В. А. Разработка и исследование математической модели бесконтактного асинхронизированного турбогенератора с многофазным каскадным возбудителем. *Праці ІЕД НАНУ*. 2012. № 31. С. 49–58.
- Рудевіч Н. В., Піскурьов М. Ф. Математична модель синхронного генератора в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів в середовищі Matlab. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Темат. вип.: Енергетика, надійність та енергоефективність*. Харків: НТУ «ХПІ». 2013. № 17 (990). С. 115–119.
- Ульянов С. А. *Электромагнитные переходные процессы*. Москва: Энергия, 1970. 520 с.
- Куликов Ю. А. *Переходные процессы в электрических системах*. Москва: Мир, 2003. 183 с.
- Пивняк Г. Г., Винославский В. Н., Рибалко А. Я., Несен Л. И. *Переходные процессы в системах электроснабжения: учеб. для вузов.* / ред. Пивняк Г. Г. Москва: Энергоатомиздат, 2003. 548 с.
- Копылов И. П. *Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов*. Москва: Высш. шк., 2001. 327 с.
- Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. *Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник*. Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2010. 608 с.
- Веников В. А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. Москва: Высш. шк., 1985. 536 с.
- Рудевіч Н. В., Піскурьов М. Ф. Розрахунок вихідних параметрів математичної моделі синхронного генератора в фазних координатах. *Наукові праці ДонНТУ. Сер.: Електротехніка і енергетика*. 2013. № 1 (14). С. 241–244.

#### References (transliterated)

- Mahseredjian J., Dinavahi V., Martinez J. Simulation Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on power delivery*. 2009, vol. 24, no. 3, pp.1657–1669.
- Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* [Design of electrical engineering devices in Matlab, SimPowerSystems i Simulink]. Moscow, DMC Press Publ., Sankt-Peterburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
- German-Galkin S. G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Planning of the mechatronic systems on the PC]. Sankt-Peterburg, Korona-Vek Publ., 2008. 368 p.
- Shakaryan Yu. G., Labunets I. A., Sokur P. V. Tselesoobraznost' i perspektivy osnashcheniya elektrostantsiy asinkhronizirovannyimi turbo- i gidrogeneratorami [Expediency and prospects of equipment of power-stations asynchronized turbo- and hydrogenerators]. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Elektroenergo-2002". Sbornik "Elektrosila". Vyp. 42* [Scientific-practical Conf. "Electricity 2002". Collection "Electrosila". Vol. 42]. Sankt-Peterburg, 2003, pp. 35–43.
- Labunets I. A. Asinkhronizirovannye turbogeneratory [Asynchronized turbogenerators]. *Novye tekhnologii v energetike* [New energy technologies]. Moscow, RAO "EES Rossii" Publ., 2002, pp. 139–144.
- Shevchenko V. V., Pototskiy D. V. Ispol'zovanie asinkhronizirovannykh turbogeneratorov dlya stabilizatsii napryazheniya v energosisteme [Use of asynchronized turbogenerators for stabilizing of tension in a grid]. *Sistemy ozbroynnyia i viys'kova tekhnika*. 2017, no. 1 (49), pp. 181–184.
- Sehed M. S., Oleksyn V. P., Oleksyn A. V. Vykorystannya asynkhronizovanykh turboheneratoriv dlya pidvyshchennya nadiynosti roboty elektrostantsiy ta rehulyuvannya napruhy [The use of asynchronized turbogenerators is for the increase of reliability of work of power-stations and adjusting of tension]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. Seriya: "Enerhetyka ta elektrotekhnika"* [Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute. Ser.: Power Engineering and Electrical Engineering]. Vinnytsia, VNTU Publ., 2010, no. 6, pp.63–65.
- Shaybekov A. F., Roginskaya L. E., Semenov V. V. Elektromagnitnye protsessy v asinkhronizirovannoy sinkhronnoy mashine. [Electromagnetic processes are in an asynchronized synchronous machine]. *Vestnik UGATU* [Bulletin of UGATU]. Ufa, UGATU Publ., 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 72–76.
- Shakaryan Yu. G. *Asinkhronizirovannye sinkhronnye mashiny* [Asynchronized synchronous machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 192 p.
- Semenov V. V. Virtual'naya model' asinkhronizirovannogo sinkhronnogo generatora avtonomnykh sistem [Virtual model of

- asynchronized synchronous generator of the autonomous systems]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya*. 2009, no. 1 (15), pp. 25–28.
11. Minyaylo O. S., Mavrin O. I., Pokrovs'kyi K. B., Chaban A. V. Matematychna model' asynkronizovanoho turbogeneratora u faznykh koordynatakh [A mathematical model of asynchronized turbogenerator is in phase coordinates]. *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy*. 2008, no. 615, pp. 93–98.
  12. Chashko M. V., Revenko A. G. Simulink model' asynkronizovanoho sinkhronnogo generatora [Simulink model of asynchronized synchronous generator]. *Zbirnyk naukovykh prats' "Problemy avtomatizovanoho jelektroprivoda. Teoriya i praktika"* [Collection of scientific works "Problems of the automated electric drive. Theory and practice"]. 2005, no. 3, pp. 386–388.
  13. Bober V. A., Galinovskiy A. M., Saratov V. A. Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli beskontaktnogo asynkronizovanoho turbogeneratora s mnogofaznym kaskadnym vzbuditelem [Development and research of mathematical model of noncontact asynchronized turbogenerator with a multiphase cascade causative agent]. *Pratsi IED NANU* [Works of IER of NASU]. 2012, no. 31, pp. 49–58.
  14. Rudevich N. V., Piskur'ov M. F. Matematychna model' synkhronnogo heneratora v faznykh koordynatakh dlya doslidzhennya elektromagnitnykh perekhidnykh protsesiv v seredivyshche Matlab [Mathematical model of synchronous generator in phase coordinates for research of electromagnetic transients in the environment of Matlab]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Tematychnyy vypusk "Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Thematic issue: Energy, reliability and energy efficiency]. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 17 (990), pp. 115–119.
  15. Ul'yanov S. A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy* [Electromagnetic transients]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p.
  16. Kulikov Yu. A. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transients are in the electric systems]. Moscow, Mir Publ., 2003. 183 p.
  17. Pivnyak G. G., Vinoslavskiy V. N., Ribalko A. Ya., Nesen L. I. *Perekhodnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya: uchebnik dlya vuzov* [Transients are in the systems of power supply: textbook for institutions of higher learning]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 548 p.
  18. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical design of electric machines]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 2001. 327 p.
  19. Kyrylenko O. V., Sehedra M. S., Butkevych O. F., Mazur T. A. *Matematychni modelyuvannya v elektroenerhetytsi* [A mathematical design is in an electroenergy]. L'viv, Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu "L'viv's'ka politekhnika", 2010. 608 p.
  20. Venikov V. A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanics transients are in the electric systems]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1985. 536 p.
  21. Rudevich N. V., Piskur'ov M. F. Rozrachunok vykhidnykh parametriv matematychnoyi modeli synkhronnogo heneratora v faznykh koordynatakh [A calculation of initial parameters of mathematical model of synchronous generator is in phase coordinates]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: "Elektrotekhnika i enerhetyka"* [Scientific works of DNTU. Ser.: Electrical Engineering and Power Engineering]. 2013, no. 1 (14), pp. 241–244.

Надійшло (received) 10.03.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Рудевич Наталія Валентинівна (Рудевич Наталья Валентиновна, Rudevich Nataliia Valentynivna)** – доктор педагогічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: [n.rudevich@ukr.net](mailto:n.rudevich@ukr.net)

**Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Hryb Oleh Herasymovych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3542-5625>; e-mail: [ae\\_khpi@ukr.net](mailto:ae_khpi@ukr.net)

**Піскуров Михайло Федорович (Пискуров Михаил Федорович, Piskurov Mykhailo Fedorovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Електричні станції»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2348-6984>; e-mail: [piskurev@ukr.net](mailto:piskurev@ukr.net)

**Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Karpaliuk Ihor Tymofiiovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: [humpway@gmail.com](mailto:humpway@gmail.com)